

2003 год

## Исследование «спящих» вулканов

*О. А. Богатиков*

Вулканы принято делить на активные, «спящие», и потухшие. Наибольшую загадку представляют из-за своей непредсказуемости «спящие» вулканы. И хотя из 100 «спящих» вулканов «просыпаются» всего 3–4, они очень опасны внезапной возможностью возобновления своей деятельности.

Типичным примером «спящих» вулканов на территории России являются вулканы Эльбрус и Казбек на Кавказе. Вследствие этого в этом регионе проводится большая работа по их изучению и возможных масштабов извержения. К настоящему времени лучше всего изучен самый высокий в Европе вулкан Эльбрус.

На первом этапе исследований была изучена и проанализирована геодинамическая обстановка Кавказа, существовавшая здесь с позднего миоцена (~ 10–11 млн лет назад) до настоящего времени.

Анализ имеющихся и полученных нами новых данных по геодинамике Большого Кавказа позволил выявить следующие важные особенности, присущие коллизионной структуре:

1. Все плиоцен-голоценовые вулканы Турции, Ирана, Армении, Грузии и Северного Кавказа, так же как и эпицентры с очаговыми зонами мелко- и глубокофокусных сильных землетрясений, не выходят за границы коллизионной структуры.

2. Современные максимальные горизонтальные (10–17 мм/год на юге зоны коллизии с постепенным ее уменьшением в северном направлении до 1–7 мм/год в пределах Ставропольского поднятия) и вертикальные (до 8–13 мм/год) перемещения отдельных блоков темной коры также наблюдаются только в пределах коллизионной структуры.

3. Установлено нарастание сейсмической активности в направлении с юга на север за последние 25–30 лет (Спитакское, Рачинское, Джавское, Параванское, Чалдыранское и другие, более мелкие землетрясения).

Следовательно, эта структура действительно характеризуется повышенной сейсмической и вулканической активностью.

На втором этапе исследований, переходя к оценке состояния вулканов Эльбрус и Казбек, следует отметить, что по принятой вулканологами мира классификации, вулкан считается активным, или «спящим», если его последнее извержение было не более чем 7 тыс. лет тому назад. С помощью радиоуглеродного датирования ( $^{14}\text{C}$ ) нами было установлено [Богатилов и др., 1998], что в голоцене активность вулкана Эльбрус, как из вершинных, так и из мелких паразитических кратеров, происходила в интервалах времени 7300–7200, 6000–5800, 5200, 4000, 2900, 2600 гг. до нашей эры и в I–II веках нашей эры. В пределах Казбека пока удалось датировать только несколько извержений, которые имели место примерно 7000–6000 тыс. лет назад.

Необходимо подчеркнуть еще одну важную особенность, заключающуюся в том, что чем длительнее был период покоя вулкана после его последнего извержения, тем мощнее может быть его будущее извержение.

Если эти вулканы действительно активны, то под ними сейчас должны располагаться приповерхностные магматические камеры и глубинные очаги. Для получения объективных данных о наличии или отсутствии камеры и очага под Эльбрусом нами были применены следующие независимые методы исследований.

### **Выявление тепловой аномалии, связанной с приповерхностной (промежуточной) магматической камерой**

Выяснение местоположения, формы и размеров промежуточной (приповерхностной) магматической камеры и глубинного очага в районе современной вулканической постройки Эльбруса является весьма актуальной задачей для оценки возможности возобновления в Приэльбрусье вулканической активности и связанных с нею катастрофических последствий. Важно отметить, что геофизические исследования (гравика, магнитотеллурическое зондирование и др.) надежно выявили приповерхностную магматическую камеру и глубинный очаг, но только, к сожалению, в одном пересечении по профилю, проходящему через вулканическую постройку Эльбруса из долины реки Баксан через седловину между двумя вершинными кратерами и далее на север в долину реки Малки.

Для более целенаправленного расположения будущих геофизических профилей и возможного их разрежения необходимо обработать материалы по тепловому дистанционному зондированию (американская система спутников NOAA) территории Приэльбрусья.

Главной целью применения этого метода является обнаружение и оконтуривание зоны температурного влияния над магматической камерой и очагом в районе Эльбрусского вулканического центра на основе анализа материалов космической съемки видимого и теплового диапазонов длин волн.

Метод теплового дистанционного зондирования (ТДЗ) основан на бесконтактном измерении температуры поверхности и представляет собой информационный слой, на который проецируются: вещественно-структурные неоднородности от поверхности до глубины проникновения суточных (годовых) колебаний температуры; процессы тепло-массопереноса (флюидодинамика) в верхних слоях земной коры; экзогенные и эндогенные источники тепла. Перечисленные факторы прямо или косвенно могут отражать глубинное строение Земли, а также нестационарные процессы в верхних слоях коры. Идентификация факторов и определение вклада каждого из них проводится на основе результатов математического и физического моделирования, методов комплексного анализа индикационных признаков теплового поля. Методика выявления зон влияния магматических очагов и оценки вулканической активности базируется на сравнительном анализе изменчивости теплового поля, тепловых и физических свойств земной поверхности исследуемого региона и сходных тестовых вулканически активных районов с современными извержениями.

На рис. 1 приведена карта температуры земной поверхности в районе вулкана Эльбрус с градациями  $0,84^{\circ}\text{C}$ , построенная по фрагменту теплового снимка со спутника NOAA в состоянии на 00 ч 24 мин (по Гринвичу) 24.02.1998 г.

На карте температуры поверхности вулканической постройки Эльбрус четко видно разделение двух вершинных кратеров (А, В), покрытых ледником, с разницей температур в  $0,5^{\circ}\text{C}$  (восточный кратер теплее западного). Следовательно, по этому параметру можно сделать вывод о том, что под вулканом имеется эндогенный источник тепла, каковым может быть приповерхностная магматическая камера.

### **Гидрогеологический метод определения эндогенного источника тепла**

Температура вод минеральных источников даст нам информацию

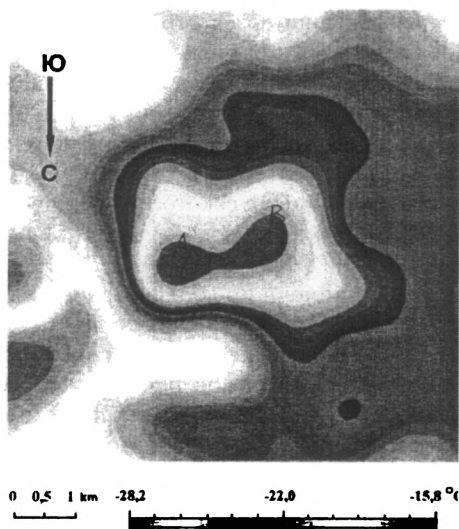


Рис. 1. Температура земной поверхности в районе вершинных кратеров Эльбруса по данным спутников NOAA

о физических условиях их формирования (глубине их циркуляции), и по этому параметру они подразделяются на два класса — холодные и термальные. В процессе наших исследований было учтено ~ 200 измерений температур различных минеральных источников Приэльбрусья, расположенных на расстоянии от 5–6 км и до 80 км от Эльбруса, проведенных в разные годы. При обработке полученных и литературных данных была выявлена тенденция роста температур водопроводов по мере приближения к Эльбрусу.

Известно, что температура вод источников формируется под воздействием разнородных факторов как экзогенного, так и эндогенного характера. К экзогенным факторам относятся соотношение поверхностного и грунтового стока и высота над уровнем моря. Среди эндогенных факторов основная роль принадлежит проявлениям глубинного магматизма и его производной — современного вулканизма, влияние которых накладывается на фоновое тепловое поле региона. Для получения более корректных данных по температурам минеральных источников с учетом экзогенных данных была рассчитана [Рогожин и др., 2001] так называемая приведенная (к единой гипсометрической отметке — уровню моря) температура источника по формуле

$t_{\text{прив}} = t_{\text{изм}} + (dt/dh)h$ , где  $t_{\text{изм}}$  – измеренная температура воды в источнике;  $dt/dh = 3.5^\circ\text{C}$  – высотный градиент температуры;  $h$  – абсолютная отметка источника в км;  $t_{\text{прив}}$  – приведенная температура воды в источнике.

Наиболее высокие значения температур наблюдаются в радиусе 20 км от вершинных кратеров Эльбруса, а затем постепенно уменьшаются до фоновых величин на расстоянии до 80 км (рис. 2). Вероятно,

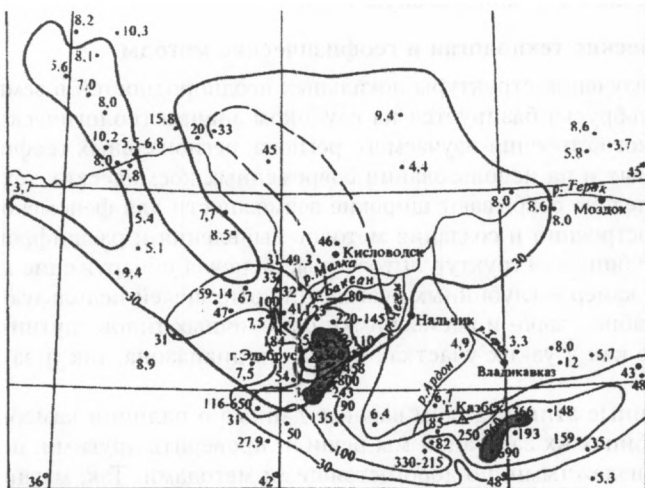




Рис. 2. Латеральные вариации величин отношений  $^3\text{He}/^4\text{He}$  и плотностей кондуктивного теплового потока для Центрального Кавказа

 – распределение плотности кондуктивного теплового потока в мВт/м<sup>2</sup>

 – средние значения отношений  $^3\text{He}/^4\text{He} \times 10^{-2}$ :  
а – достоверные,  
б – предполагаемые

что в радиусе 20 км вокруг Эльбруса скорее всего, фиксируется тепловое воздействие приповерхностной (промежуточной) магматической камеры, размеры которой по геофизическим данным аппроксимируются слегка уплощенной сферой диаметром до 16–18 км, толщиной около 7–8 км с центром на глубине 10–12 км от вершины Эльбруса.

Следовательно, из анализа распределения в Приэльбрусье приведенных температур вод минеральных источников можно сделать предварительный вывод о наличии сейчас под Эльбрусом и под одно-

именной кальдерой как промежуточной магматической камеры, так и глубинного очага.

Анализ литературных данных по минеральным источникам вулканически активных областей Камчатки, Курил, Аляски, Запада США, Колумбии, Индонезии и Италии показал, что при подготовке к извержению обычно резко изменяется температура и состав вод минеральных источников и состав газов с обильным выделением радона, что может негативно сказаться на здоровье населения, регулярно употребляющего эту минеральную воду.

### **Космические технологии и геофизические методы**

Метод изучения структуры локальных неоднородностей в земной коре Приэльбрусья базируется на глубоком знании геологического, тектонического строения изучаемого региона, региональных геофизических данных и на использовании современных космических технологий. Последние открывают широкие возможности для феноменологических построений и создания методов выявления и расшифровки природы глубинных структур литосферы, включая обнаружение магматических камер и глубинных очагов. Для этих целей используются разномасштабные аэро- и космоснимки с различных типов спутников, полученные как в узких участках видимого диапазона, так и за его пределами.

Полученные этим методом важные данные о наличии камеры и очага и глубинах их залегания мы решили проверить другими, независимыми, надежными, но дорогостоящими методами. Так, магнитотеллурическим зондированием пройден пока единственный профиль через вулкан Эльбрус. Он начался на поляне Азау (истоки р. Баксан), затем прошел вверх по склону вдоль канатной дороги, через «скалы Пастухова», седловину между западной и восточной вершинами и далее на север в долину реки Малки. На этом профиле были очень четко выявлены приповерхностная магматическая камера и глубинный очаг (рис. 3), расположенные в тех же интервалах глубин, которые были установлены первым методом. И наконец, для еще большей уверенности в полученных данных мы заверили их по тому же профилю гравиметрическими наблюдениями, которые полностью подтвердили наши данные о присутствии камеры и очага и о глубинах залегания их кровель. Следовательно, если теперь нет сомнений в наличии под вулканом Эльбрус камеры и очага, то генерировать расплав в низах континентальной коры должна активная мантия, ответвление от глубинных плюмов.

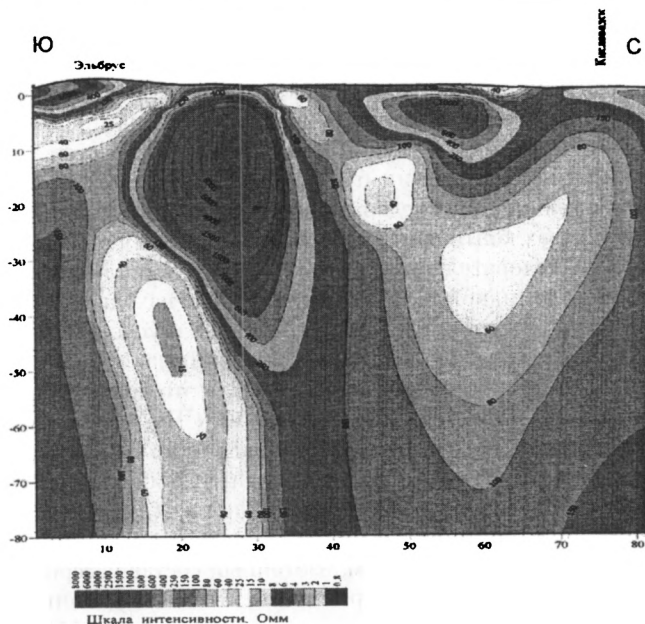


Рис. 3. Геоэлектрический разрез, отражающий интерпретацию данных, полученных методом магнитотеллурического зондирования по линии Приэльбрусского профиля. Горизонтальная ось – расстояние по профилю в 1 км. Вертикальная ось – глубина в км

Для проверки этой гипотезы были определены величины изотопных гелиевых отношений ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ) в спонтанных газах минеральных источников Приэльбрусья и прилегающих территорий (см. рис. 2).

Кроме того, при проведении геофизических исследований было установлено, что под Эльбрусом существует как бы сейсмическая брешь, что вероятнее всего объясняется наличием приповерхностной магматической камеры и глубинного очага.

**Изотопный метод оценки состояния мантии (активная или пассивная) под Приэльбрусьем по величинам гелиевых отношений ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ) в спонтанных газах минеральных источников**

В процессе изучения изотопии стронция и ниобима в породах лавовых потоков, характеризующих докальдерный ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,705091 - 0,706143$ ; величины  $\epsilon\text{Nd}$  от  $-0,94$  до  $-1,23$ ) и кальдерный с посткальдерным ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,705265 - 0,706533$ ; величины  $\epsilon\text{Nd}$

от  $-1,32$  до  $-1,95$  и от  $-0,33$  до  $0,86$  соответственно) циклы развития Эльбрусского вулканического центра, было убедительно доказано присутствие мантийной компоненты в расплавах, сформировавших Эльбрусский вулканический центр и поступающих на поверхность из промежуточной камеры и глубинного очага. Скорее всего эти магмы образовались при смешении базальтовых или андезибазальтовых расплавов, имеющих опосредованный мантийный источник (плавление пород в низах континентальной коры) с кислой риолитовой коровой магмой. Следовательно, мантия во время прошлых извержений Эльбруса была активной. Если мантия и сейчас находится в активном состоянии и продолжает генерировать расплав в условиях низов континентальной коры (глубинный магматический очаг и связанная с ним промежуточная приповерхностная камера), то это должно было найти отражение в величинах гелиевых отношений ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ) в спонтанных газах минеральных источников. Для проверки этого предположения были трижды (в 1998–2000 гг.) опробованы 42 минеральных источника в Приэльбрусье и прилегающих регионах (см. рис. 2).

В спонтанных газах определялись содержание  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{O}_2$  газохроматографическим методом, изотопный состав углерода в  $\text{CO}_2$  – масс-спектроскопически (на приборе МИ-1201 В); концентрации и изотопия гелия, неона, аргона (на масс-спектрометре МИ-1201ИГ) и расчет величин отношения  $^3\text{He}/^4\text{He}$ ,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ,  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  производились в Геологическом институте КНЦ РАН. При интерпретации данных по изотопии гелия измеренные значения  $^3\text{He}/^4\text{He}$  корректировались с учетом степени контаминированности пробы атмосферным воздухом, оцениваемой по величине отношения  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  [Прасолов, 1990].

### Латеральные вариации изотопного состава гелия

Исследованиями Б. Г. Поляка и др. [1979] было показано, что для значительной части территории Северного Кавказа, особенно в пределах коллизионной структуры, характерны высокие (превышающие как «канонические» величины для дорифейской коры [ $R = 1,0 \times 10^{-8}$ ], так и фоновые для эпигерцинской Скифской плиты [ $R = 1,0 \times 10^{-7}$ ]), значения отношения  $^3\text{He}/^4\text{He} = R$ . Максимальные величины  $R$  были установлены только в пределах Эльбрусской кальдеры. От нее высокие значения  $R$  прослеживаются в район Кавказских Минеральных Вод (КМВ) и далее на север в район Ставропольского сводового поднятия, располагающегося в северном окончании позднемиоцен-четвертичной коллизионной структуры (или Транскавказского поперечного поднятия). К западу от кальдеры область повышенных вели-



чин  $R$  ограничивается долинами рек Теберды и Кубани. Восточная граница выражена менее четко и проходит по долине реки Чегем, включая Верхнечегемскую позднелилоценовую кальдеру. В пределах вышеуказанного региона величина  $R$  варьируется в широком диапазоне — от субмантийных ( $1,0 \times 10^{-5}$ ) до близких к «каноническому» коровому ( $R = \sim 1-5 \times 10^{-8}$ ). Наиболее часто встречающиеся величины  $R$  варьируются в пределах от  $2,0 \times 10^{-7}$  до  $3,0 \times 10^{-6}$ . На этом фоне выделяются следующие зоны максимальных значений величин  $R$ : вдоль западного и северного подножий современной вулканической постройки Эльбруса ( $\sim 0,9 \times 10^{-5}$  в источнике Джила-Су в долине реки Бийтик-Тебе;  $0,54 \times 10^{-5}$  в источнике Джила-Су в истоках реки Малки и  $0,63 \times 10^{-5}$  в скважине № 1 в верховьях реки Кизилкол); вдоль восточной части вулканической постройки в верховьях реки Баксан (от  $0,3 \times 10^{-5}$  до  $0,68 \times 10^{-5}$  в источниках Герходжан-Су, Тырнауз, Джан-Туган, Бадаевых, Баксан-Баши) и на южном склоне Большого Кавказа (до  $0,8 \times 10^{-5}$  в районе селения Мазери). Следовательно, в выделенном поле распределения величины  $R$  (изотопно-гелиевые отношения), кроме собственно Эльбрусской аномалии, выделяются еще по крайней мере два участка с высокими значениями  $R$ . Все эти участки частично перекрываются (сливаются), что позволяет нам считать, что в целом вулкан Эльбрус приурочен к западной части этой объединенной зоны максимальных значений величин  $R$ .

Однако в непосредственной близости от вулкана наблюдается некоторая неоднородность в распределении величин  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ( $\times 10^{-8}$ ). Так, по мере удаления от вулканической постройки в северном и западном направлениях на расстояния до 9–12 км и более 15 км наблюдается резкое снижение величин  $R$  от  $(0,5-0,6) \times 10^{-5}$  до  $0,2 \times 10^{-5}$  соответственно (см. рис. 2).

Важно подчеркнуть, что границы площади с высокими значениями величин  $R$  практически совпадают с контуром кальдеры [Богатилов и др., 1998]. Эти данные позволяют нам считать, что в настоящее время под Приэльбрусьем в целом и под кальдерой в частности мантия находится в активном состоянии.

### **Флуктуации изотопного состава гелия во времени**

Хорошо известно, что в различных регионах мира в геологически однородных блоках латеральные вариации величин гелиевых отношений крайне незначительны и обычно не превышают ошибки лабораторных измерений (5–10 %). Судя по результатам ранее проведенных исследований [Поляк и др., 1979; Polyak et al., 2000] по пробам,

отобранном из одних и тех же источников в разные годы, в большинстве водопроявлений Приэльбрусья величины  $R$  также практически постоянны. Однако вблизи вулканической постройки наблюдается иная картина. Так, в нарзанах по реке Бийтик-Тебе (источники Джила-Су, Тархор-Нарзан) величина  $R$  менялась в разные годы от  $0,55 \times 10^{-6}$  до  $0,87 \times 10^{-5}$  при среднем значении  $0,3 \times 10^{-5}$ . При опробовании в 1998 г. здесь наблюдалась высокая дисперсия величин  $R$  даже в соседних грифонах. Несмотря на то, что они располагаются близко друг к другу (от первых десятков и до первых сотен метров), диапазон вариаций величин  $R$  (от  $0,18$  до  $0,32 \times 10^{-5}$ ) в них существенно превышает точность измерения величины  $R$ , давая при этом почти то же самое среднее значение  $R = 0,26 \times 10^{-5}$ . Такие вариации величин  $R$  как по площади, так и во времени (результаты анализов проб, отобранных в разные годы), скорее всего, указывают на высокую динамичность вулканической системы в Приэльбрусье и современное активное состояние вулкана Эльбрус.

Аналогичные вариации величин  $R$  во времени и пространстве наблюдались рядом исследователей на некоторых действующих вулканах Японии и Южной Америки [Sano et al., 1984; 1990; et al.], что еще раз косвенно подтверждает нашу точку зрения о том, что Эльбрус является активным вулканом и мантия под ним сейчас активна.

Особо следует отметить, что аномалии, выделенные в Приэльбрусье, по величинам  $R$  практически полностью совпадают с аномалиями и зонами резко повышенных приведенных температур, т. е. величины  $R$  повторяют, в общем, характер распределения величин приведенных температур.

На третьем этапе исследований важно определить место возможного будущего извержения вулкана Эльбрус, что поможет при прогнозировании типов и масштабов катастрофических последствий в связи с вероятным возобновлением его активности. Анализ имеющихся данных о возрастах прошлых извержений показал, что после формирования кальдеры (720–690 тыс. лет назад) в ее западной части (истоки реки Уллу-Хурзук) в интервале 660–620 тыс. лет назад функционировал один из древнейших кратеров — Кюкюртлинский, а после него, несколько восточнее, образовались кратеры, которые и сформировали современную вулканическую постройку Эльбруса.

Однако в разное время извержения были и вдали от стратовулкана. Так, 140–150 тыс. лет назад сформировался Сылтранский вулканический центр, расположенный в 15 км к востоку от современной вулканической постройки, затем слабый всплеск вулканической

активности наблюдался еще восточнее — в левом борту долины реки Баксан (серия неков). 39 тыс. лет тому назад в 20 км к северо-востоку от Эльбруса функционировал маленький одноактный вулкан Таш-Тебе. Все эти данные убедительно свидетельствуют о значительных размерах приповерхностной магматической камеры и глубинного очага и о том, что во время эволюции вулкана извержения были не только в пределах стратовулкана, но и на значительном удалении от него. Из этого вытекает предположение о том, что будущее извержение не обязательно будет из современных вершинных кратеров Эльбруса. Для определения возможных мест прорыва магмы на дневную поверхность планируется ретроспективное (5 и 8 лет назад) изучение тепловых космических снимков, на которых будут выявлены тепловые аномалии, а динамика их развития (образование резко контрастных аномалий в конкретных местах) и укажет нам предполагаемый участок, где магма может выйти на поверхность, т. е. произойдет извержение с образованием нового вулкана или же оно будет из современной вулканической постройки. Над выявленными тепловыми аномалиями, обусловленными эндогенными источниками тепла (камера и, возможно, очаг), будут проводиться по выбранным профилям геофизические исследования с обязательным сопровождением GPS (космическая система глобального позиционирования) измерений скоростей вертикальных и горизонтальных перемещений (с точностью до 5–7 мм/год).

Логика применения GPS-измерений скоростей вертикальных перемещений состоит в том, что при подготовке к извержению из глубинного очага расплав будет поступать в приповерхностную магматическую камеру, увеличивая ее объем и вызывая адекватное всплывание, в районе термальной аномалии вмещающих ее пород. Зная глубину залегания кровли камеры и скорость ее всплывания к дневной поверхности, можно будет грубо оценить время начала извержения.

На четвертом этапе исследований выявляются возможные типы и масштабы катастрофических последствий прошлых извержений Эльбруса, с тем чтобы более корректно предсказать возможные типы и масштабы катастрофических событий в случае возобновления вулканической активности.

Анализ геологической, геоморфологической и гляциологической обстановок на современной вулканической постройке позволил предполагать, что независимо от местонахождения эруптивного центра силы и типа будущих извержений Эльбруса и состава излившихся лав активность вулкана может сопровождаться образованием катастрофических

лахаров, подпрудных озер и наводнениями, поскольку для их возникновения в пределах вулканической постройки везде имеются благоприятные условия. В связи с этим было необходимо установить, имели ли место такие лахары в Приэльбрусье в прошлом, по каким долинам рек, берущих начало с вулкана, они распространялись и как далеко по ним они проходили. Первоочередными объектами для таких исследований стали наиболее плотно заселенные и легкодоступные для посещения долины рек Баксана, Кубани и Малки от их верховьев и до выхода на равнину, что в среднем соответствует расстоянию в 100 км. Вниз по долине реки Баксан лахары проходили на расстояние 55, 57 и 72 км около 6200, 5100 и 4060 лет тому назад. Вниз по долине реки Малки лахары спускались примерно на 70 км.

В результате проведенных исследований были установлены следующие типы катастрофических последствий (показанные на рис. 4):

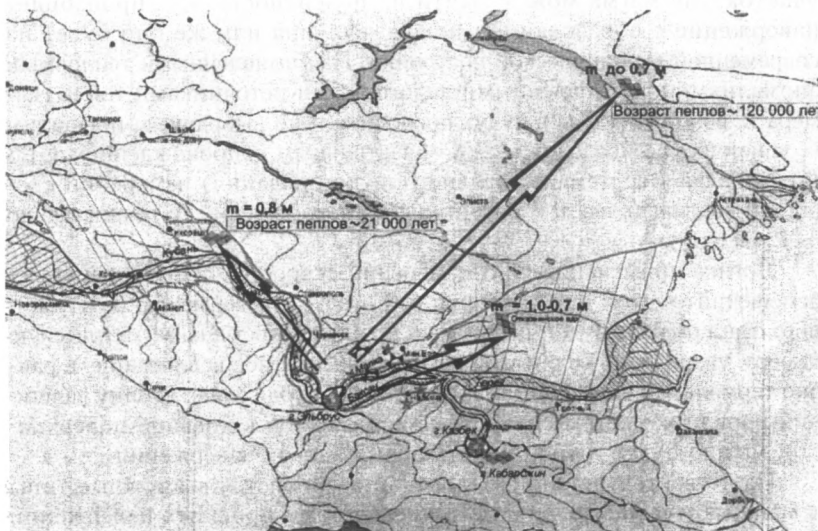


Рис. 4. Схематическая карта катастрофических последствий извержений вулкана Эльбрус:

- 1 – снежно-ледовые панцири на вулканических постройках;
- 2 – мелкие эрунтивные центры;
- 3 – места находок отложений палеолахаров;
- 4 – места находок аэральнo перенесенных пеплов при взрывных извержениях с указанием их мощности и времени проявления;
- 5 – участки возможного катастрофического затопления вдоль долин рек, берущих начало с вулканов Эльбрус и Казбек;
- 6 – зона влияния возможного катастрофического затопления

катастрофические лахары; взрывные извержения с аэральным переносом пеплового материала на сотни километров (пока датированы извержения, имевшие место примерно 700, 120 и 21 тыс. лет тому назад); образование в истоках реки Малки подпрудных озер (2280 лет назад) с их последующими прорывами и наводнениями; сейсмодислокации, представленные нептуническими дайками, каменными лавинами (происходили 1630 и 530 лет назад), трещинами отрыва, оползнями и каменно-ледовыми обвалами в I–II вв. нашей эры в истоках реки Кюкюртли, аналогичными тем, которые происходили в Кармадонской долине к северу от вулкана Казбек; землетрясения и региональные пожары.

Анализ всего изложенного выше материала однозначно доказал необходимость организации системы мониторинга вулканической, сейсмической и гляциологической опасности и ее катастрофических последствий для Северо-Кавказского региона.

На заключительном этапе исследований решается самая актуальная задача — оценка вероятности и компьютерное моделирование (в трехмерном пространстве с построением векторной модели) возможного возобновления вулканической и сейсмической активности и связанных с ней катастрофических последствий. На предыдущих этапах исследований должны быть получены данные о наличии магматической камеры и глубинного очага, их местоположении, форме, размерах, глубинах залегания кровель и скорости их «всплывания» к дневной поверхности. Однако, основываясь только на этих данных, будет очень трудно да и практически невозможно предсказать вероятное время и место извержения вулкана, так как для этого необходимо учитывать массу факторов (наличие новейших разломов; степень тектонической раздробленности, которая может облегчить или затруднить подъем расплава к поверхности; состав вмещающих пород и температуру их плавления и т. д.), могущих направить прогнозируемое событие в ту или иную сторону. Следовательно, необходимо создание мощного математического обеспечения этой заключительной задачи, в решении которой должны принять участие не только геологические институты.

---

1. Богатиков О. А. и др. Радиоуглеродное датирование голоценовых извержений вулкана Эльбрус (Северный Кавказ, Россия) // Докл. РАН. 1998. Т. 363, № 2. С. 219–221.

2. Богатиков О. А. и др. Эльбрусская кальдера (Северный Кавказ) // Докл. РАН. 1998. Т. 363, № 4. С. 515–517.

3. Поляк Б. Г., Толстихин И. Н., Якуцени В. П. Изотопный состав гелия и тепловой поток – геохимический и геофизический аспекты тектогенеза // Геотектоника. 1979. № 5. С. 3–23.
4. Прасолов Э. М. Изотопная геохимия и происхождение природных газов. Л., 1990.
5. Рогожин Е.А. и др. Геодинамика, сейсмотектоника и вулканизм Северного Кавказа. М., 2001.
6. Polyak B.G. et al. Helium isotopes, tectonics and heat flow in the Northern Caucasus // Geochim. Cosmochim. Acta. 2000. Vol. 64, № 2. P. 1925–1944.
7. Sano Y. et al. Helium-3 emission related to volcanic activity // Science. 1984. Vol. 224. P. 150–151.
8. Sano Y., Wakita H., Williams S.N. Helium-isotopes systematic at Nevadeo del Ruiz volcano, Columbia implications for the volcanic hydrothermal system // Journ. of volcanology and geotherm. Res. 1990. Vol. 42. P. 41–52.